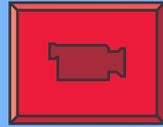


# Chapitre 5- Transformateurs Triphasés

## Transformateurs Triphasés

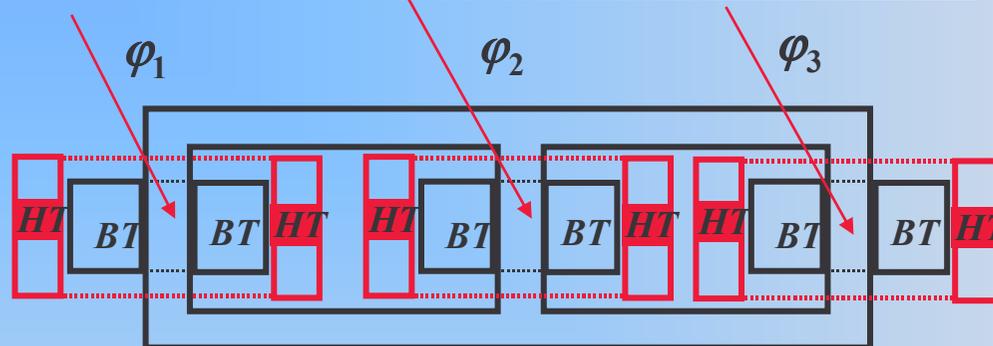
- 5.1- Constitution
- 5.2- Couplage des enroulements
- 5.3- Rapport de transformation et indice horaire
- 5.4- Couplage ZigZag
- 5.5 - Schéma monophasé équivalent
- 5.6 - Caractéristiques en charge
- 5.7 - Charge monophasée au secondaire



# 5.1-Constitution

## Transformateurs Triphasés

*Circuit magnétique triphasé à trois noyaux.*



On utilise souvent des circuits magnétiques à 3 noyaux, même si les tensions appliquées ne forment pas un système triphasé équilibré, on a obligatoirement :

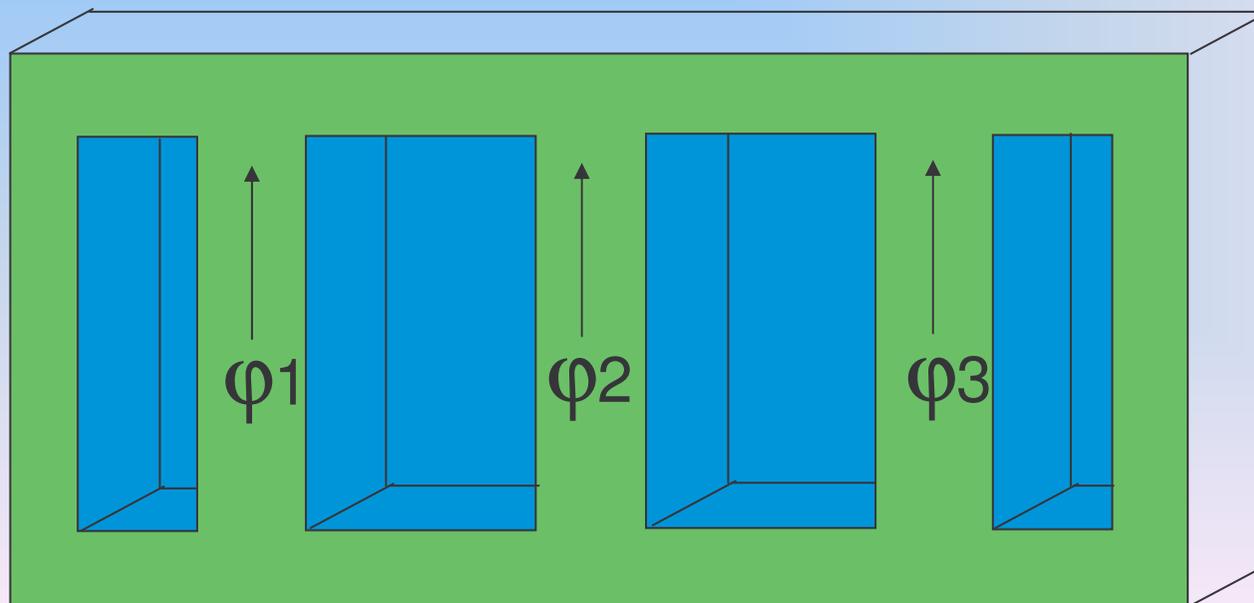
$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0$$

On dit qu'il s'agit d'un transformateur à **flux forcés**

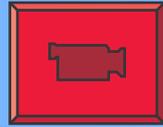
## 5.1-Constitution

### Transformateurs Triphasés

On utilise parfois des circuits magnétiques à 5 noyaux.  
Les 2 noyaux latéraux supplémentaires non bobinés forment un passage de réluctance faible pour le flux total, ce qui restitue une certaine indépendance aux flux  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $\varphi_3$



- 
- 
- 



## 3.2- Couplage des enroulements

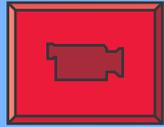
## Transformateurs Triphasés

L'association d'un mode de connexion du primaire avec un mode de connexion du secondaire caractérise un ***couplage du transformateur*** (Y Y par exemple).

Pour représenter le schéma d'un transformateur triphasé, on établit les conventions suivantes, on note par :

A, B, C les bornes du ***primaire***

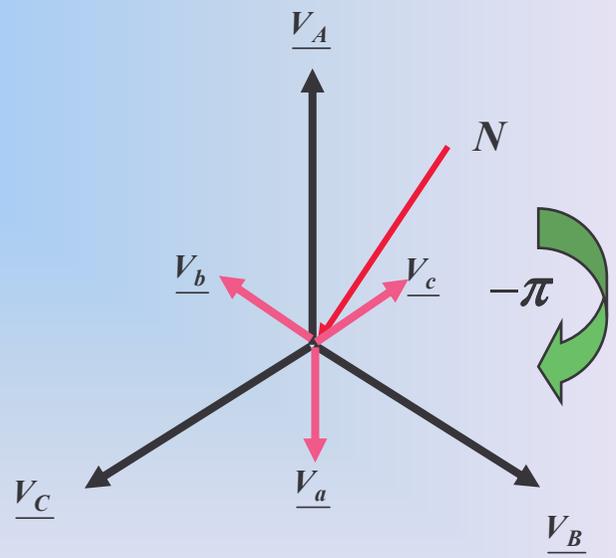
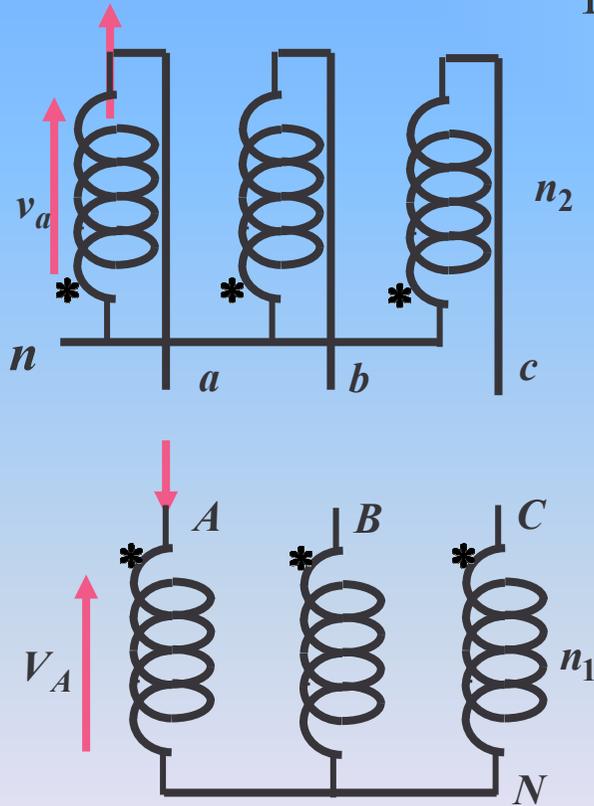
a, b, c les bornes du ***secondaire***

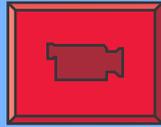


**5.2- Couplage des enroulements**

**Transformateurs Triphasés**

Il permet la sortie du point neutre très utile en B.T.

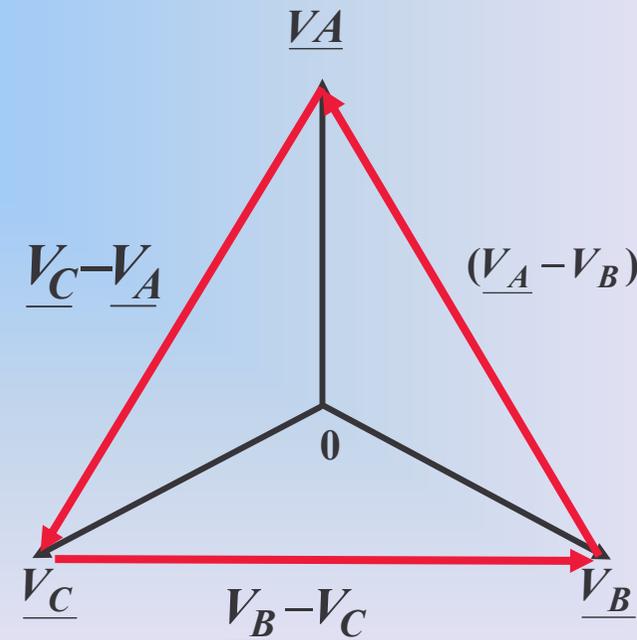
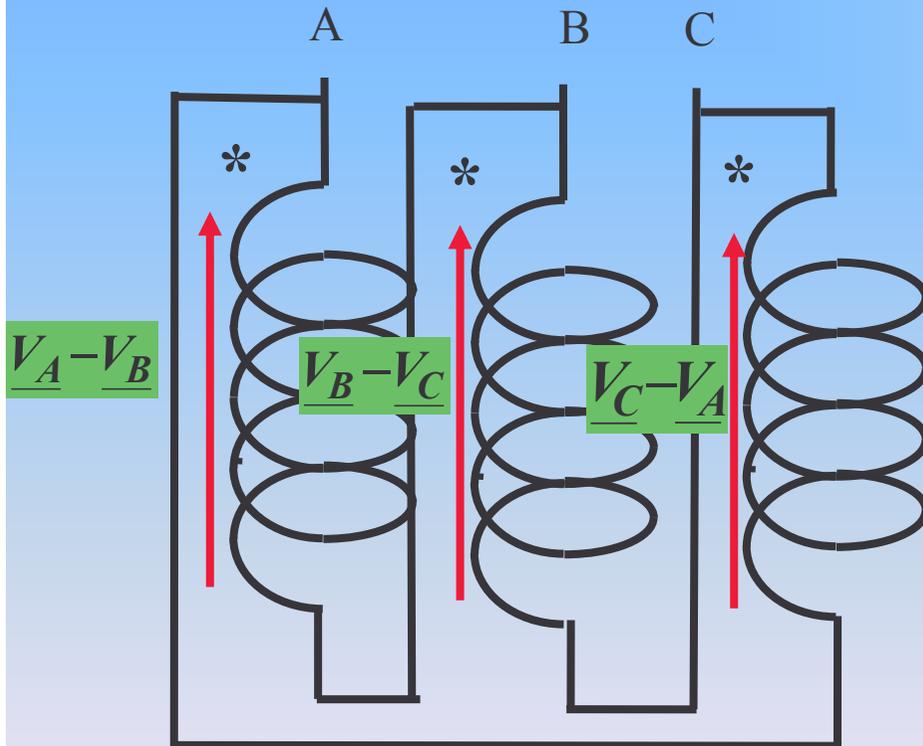




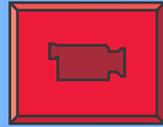
## 5.2- Couplage des enroulements

## Transformateurs Triphasés

Les trois enroulements sont *en série*, pas de conducteur *neutre*.



- 
- 
- 



### 5.2- Couplage des enroulements

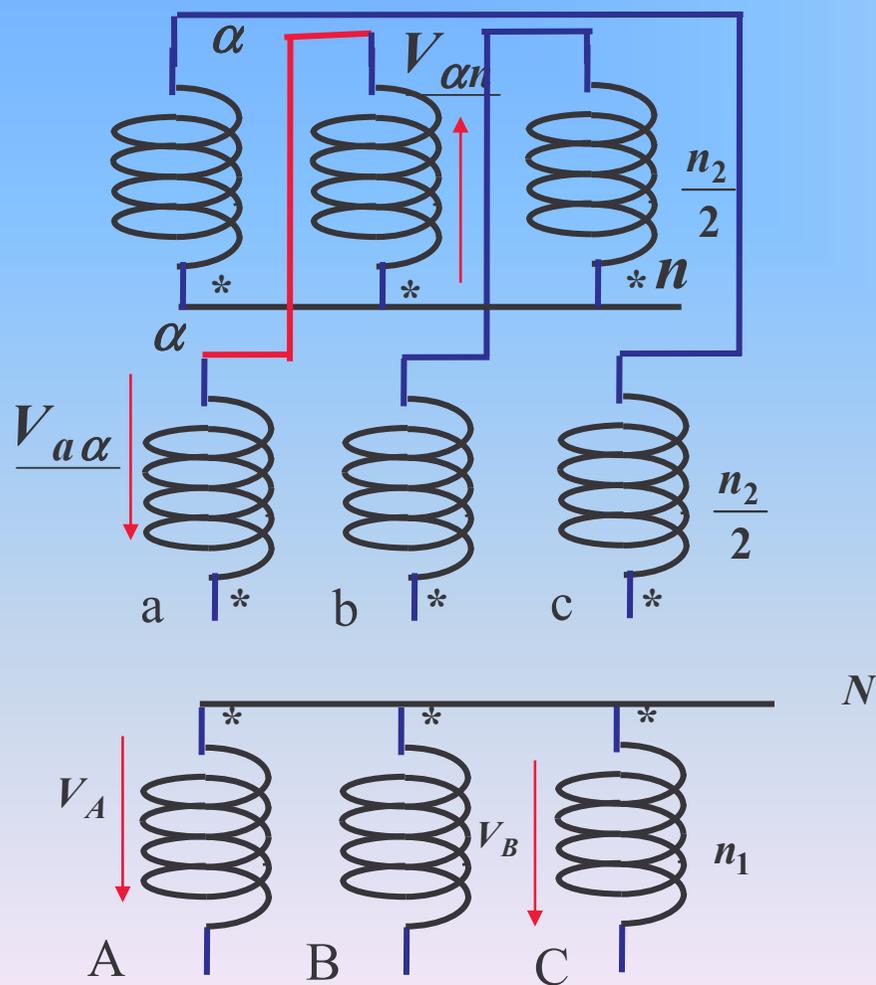
### Transformateurs Triphasés

Chaque enroulement comprend une *demie bobine sur des noyaux différents*. Les f.é.m. sont déphasées de  $120^\circ$  électriques. Avec ce type de couplage on obtient une meilleure répartition des tensions en cas de réseau *déséquilibré* côté B.T.

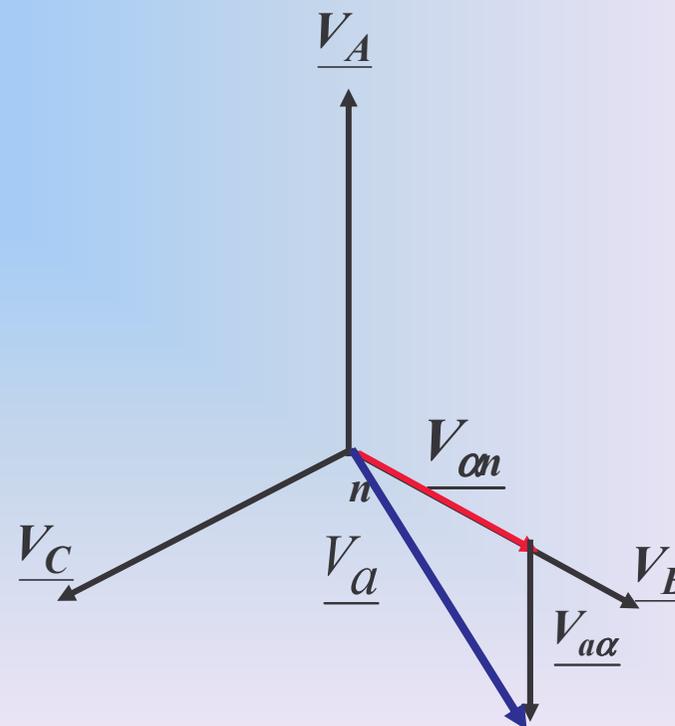


## 5.2- Couplage des enroulements

## Transformateurs Triphasés



$$\underline{V_a} = \underline{V_{a\alpha}} + \underline{V_{\alpha n}}$$



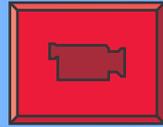
## 5.3- Rapport de transformation et indice horaire **Transformateurs Triphasés**

### Rapport de transformation

Le rapport de transformation **m** est le rapport entre la tension secondaire à vide  **$U_{20}$  (ou  $V_{20}$ )** et la tension primaire  **$U_1$  (ou  $V_1$ )**

$$m = \frac{U_{20}}{U_1} = \frac{V_{20}}{V_1} = \frac{V_a}{V_A}$$

- 
- 
- 



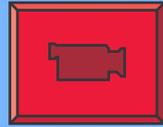
### 5.3- Rapport de transformation et indice horaire

A partir du couplage des enroulements primaire et secondaire du transformateur triphasé, il est possible de trouver son rapport de transformation et son indice horaire.

On considère chaque noyau et les enroulements qu'il porte comme un transformateur monophasé parfait puis on écrit la relation entre les tensions primaire et secondaire

$$\overline{V}_a = m e^{-j\theta} \overline{V}_A$$

- 
- 
- 

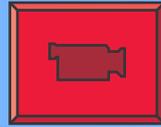


### 5.3- Rapport de transformation et indice horaire

Selon le couplage choisi, le déphasage entre tensions phase-neutre homologues ( $V_{an}$  et  $V_{AN}$  par ex) est imposé.

En triphasé, les déphasages obtenus sont nécessairement des multiples entiers de  $30^\circ$  ( $\pi/6$ ).

- 
- 
- 



### 5.3- Rapport de transformation et indice horaire

En posant  $\theta$  l'angle entre  $V_{an}$  et  $V_{AN}$ , l'indice horaire est donc le nombre entier  $n$  tel que  $\theta = n \cdot \pi/6$ , avec  $\theta$  positif,  $V_{an}$  étant toujours prise en retard sur  $V_{AN}$ .

$\theta$  varie de 0 à 330°, donc  $n$  varie de 0 à 11

$V_{AN}$  = aiguille des minutes placée sur 12

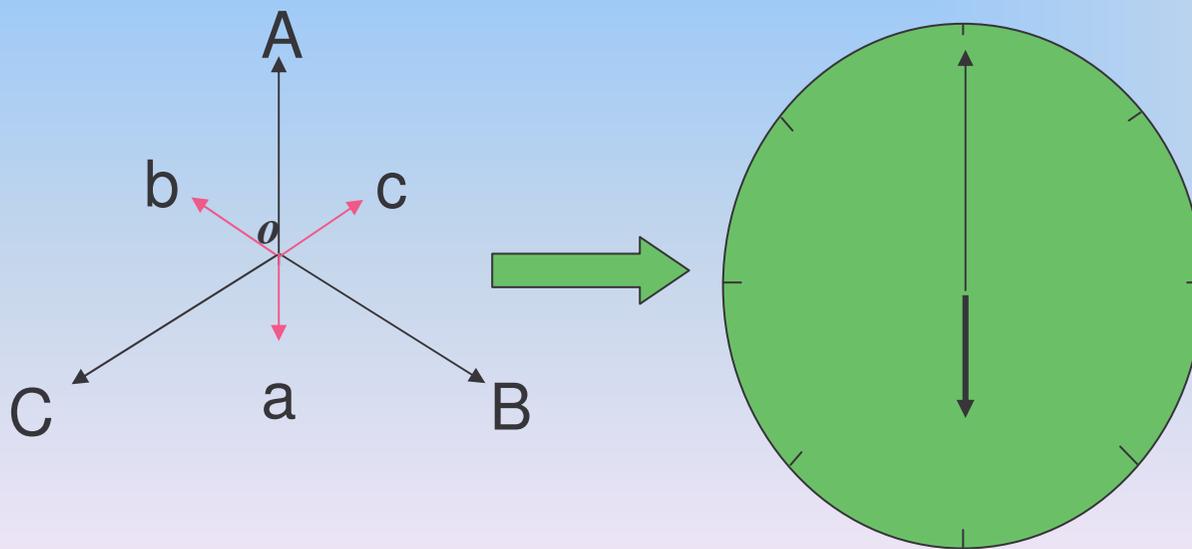
$V_{an}$  = aiguille des heures placée sur  $n$

## 5.3- Rapport de transformation et indice horaire

## Transformateurs Triphasés

## Indice horaire

Si  $\vec{OA}$  est la grande aiguille (minutes) d'une montre,  $\vec{oa}$  la petite aiguille (heures) de cette montre, ici la montre affiche **6** heures, d'où  $Yy_6$ .

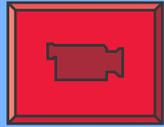


$$\overline{V}_a = m e^{-j\theta} \overline{V}_A$$

$$\theta = 6 * \frac{\pi}{6} = \pi$$

- 
- 
- 

↳ ...35



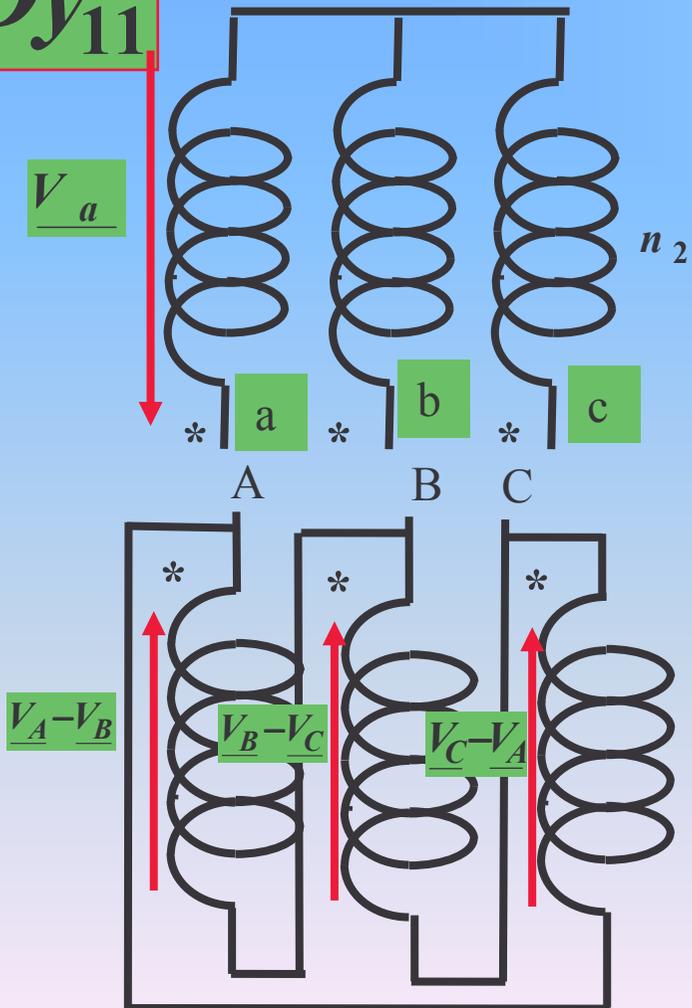
EXO 17

Page 15

### 5.3- Rapport de transformation et indice horaire

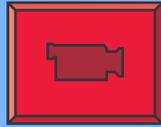
### Transformateurs Triphasés

$Dy_{11}$



$$\underline{V}_a = m * \underline{V}_A * e^{-j\theta}$$

- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 
-



## 5.3- Rapport de transformation et indice horaire

## Transformateurs Triphasés

 $Dy_{11}$ 

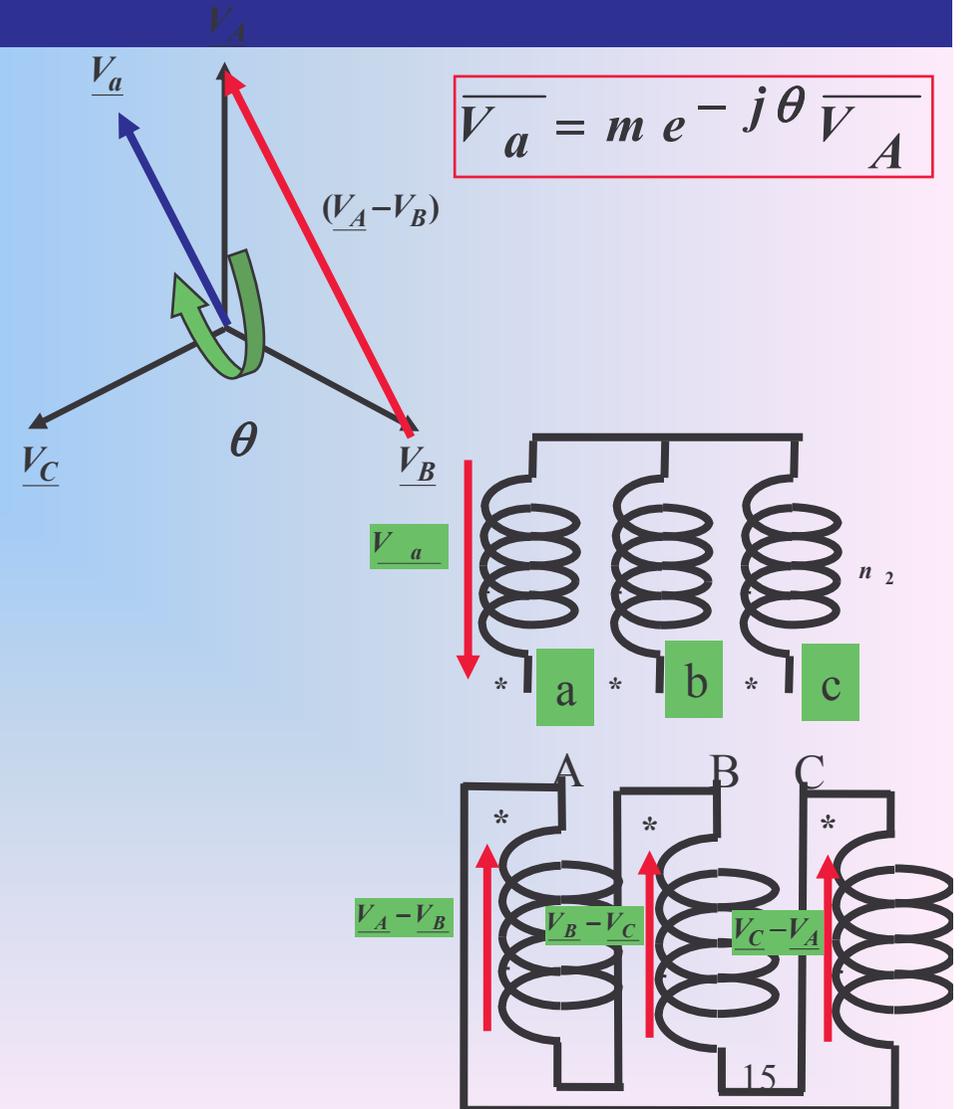
$$\underline{V}_a = \frac{1}{n_2} \frac{n_1}{n_1} (\underline{V}_A - \underline{V}_B) * e^{j0}$$

$$\underline{V}_a = \frac{n_2}{n_1} \sqrt{3} * \underline{V}_A * e^{-j11\frac{\pi}{6}}$$

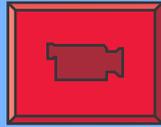
$$\frac{\underline{V}_a}{\underline{V}_A} = \frac{n_2}{n_1} \sqrt{3} e^{-j11\frac{\pi}{6}} = m e^{-j\theta}$$

$$m = \sqrt{3} \frac{n_2}{n_1}$$

$$\theta = 11 * \frac{\pi}{6}$$



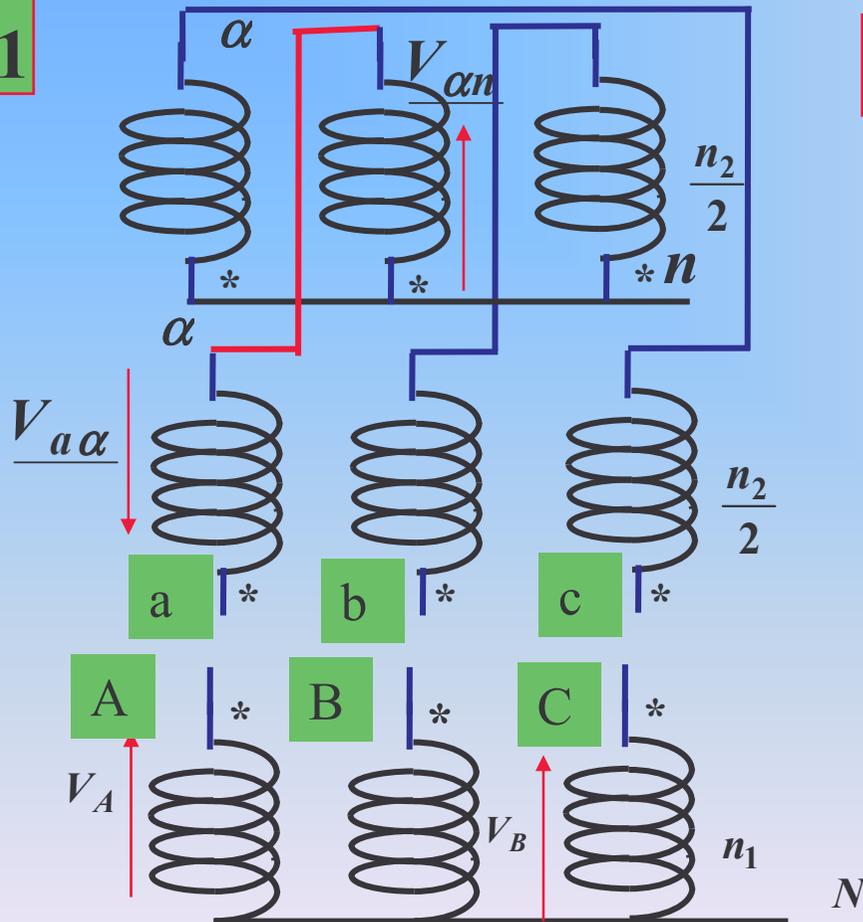
$$\overline{V}_a = m e^{-j\theta} \overline{V}_A$$



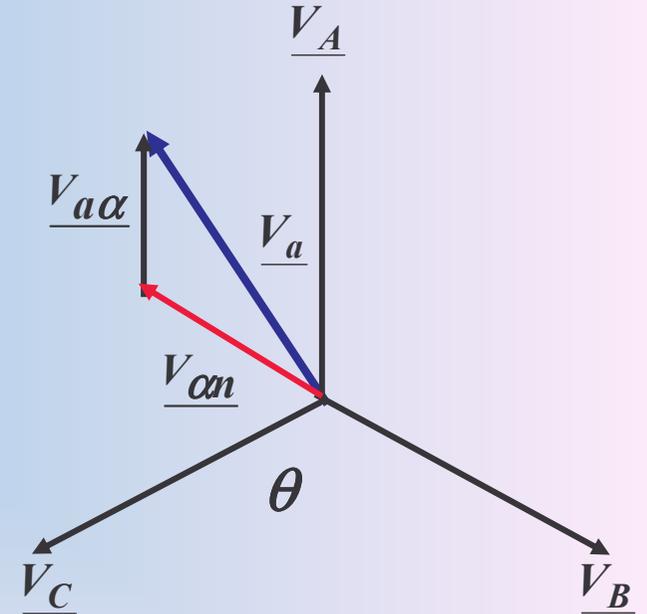
### 5. 4- Couplage zigzag

### Transformateurs Triphasés

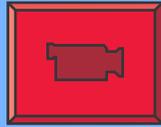
$Yz_{11}$



$$\overline{V_a} = m e^{-j\theta} \overline{V_A}$$



$$\underline{V_a} = \underline{V_{a\alpha}} + \underline{V_{\alpha n}}$$



### 5. 4- Couplage zigzag

### Transformateurs Triphasés

$$\frac{V_{\alpha n}}{\frac{n_2}{2}} = \frac{V_B}{n_1} e^{-j\pi} = -\frac{V_B}{n_1}$$

$$\frac{V_{a\alpha}}{\frac{n_2}{2}} = \frac{V_A}{n_1} e^{j0} = \frac{V_A}{n_1}$$

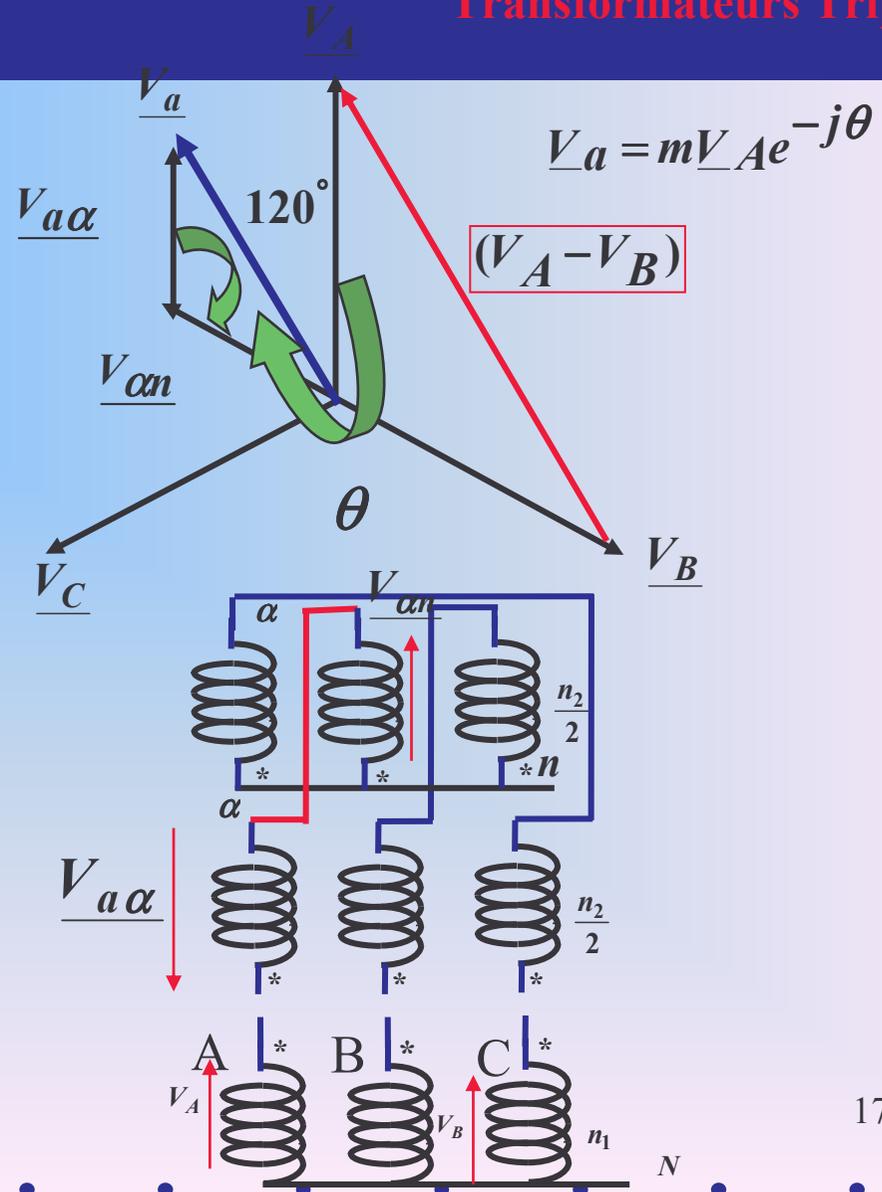
$$\underline{V}_a = \underline{V}_{\alpha n} + \underline{V}_{a\alpha}$$

$$\underline{V}_a = \frac{n_2}{2n_1} (V_A - V_B) = \frac{n_2}{2n_1} \sqrt{3} \underline{V}_A e^{-j11\frac{\pi}{6}}$$

$$\frac{\underline{V}_a}{\underline{V}_A} = \frac{n_2}{2n_1} \sqrt{3} e^{-j11\frac{\pi}{6}}$$

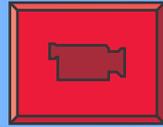
$$m = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{n_2}{n_1}$$

$$\theta = 11 * \frac{\pi}{6}$$



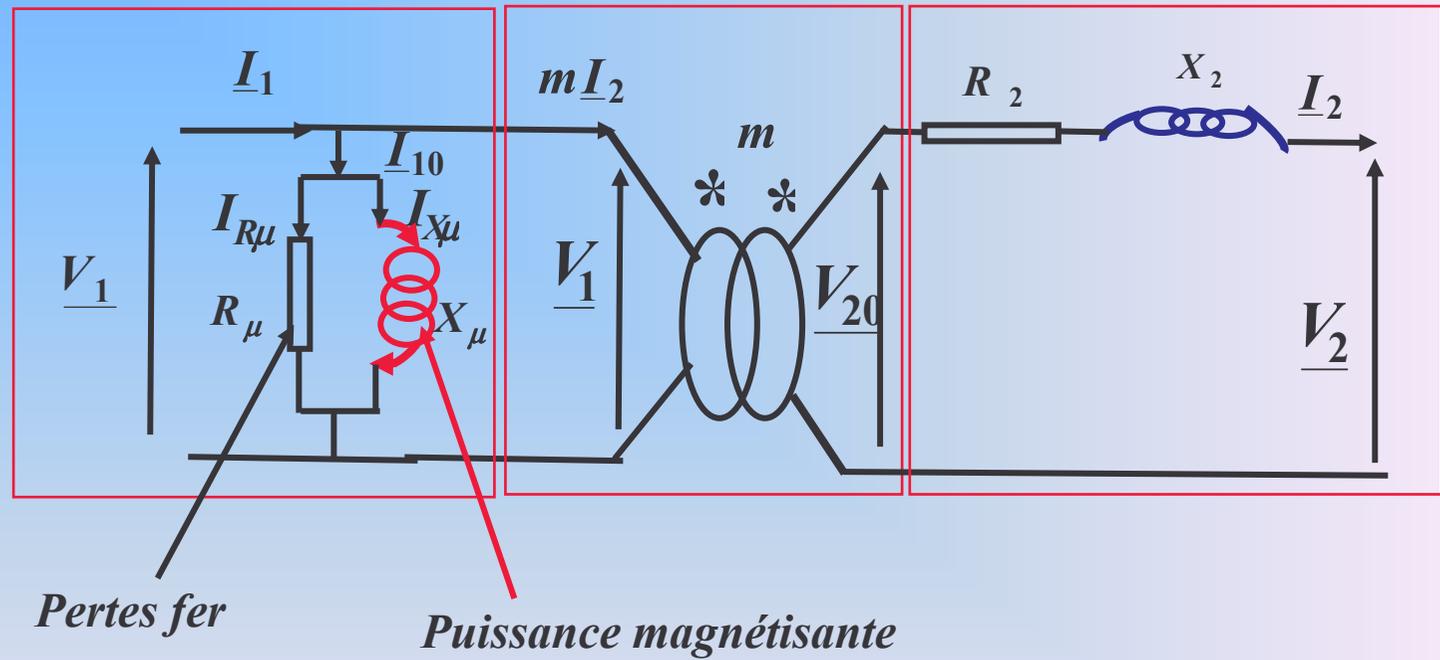
- 
- 
- 

↳ ...37



## 5.5 Schéma équivalent au transformateur dans l'hypothèse de Kapp

### Transformateurs triphasés



## 5.5 Schéma équivalent

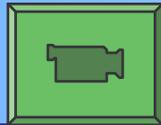
### Transformateurs Triphasés

RAPPEL

$$P_{10}^{mono} = \frac{P_{10}^{tri}}{3}$$

$$V_1 = \frac{U_1}{\sqrt{3}}$$

- 
- 
- 



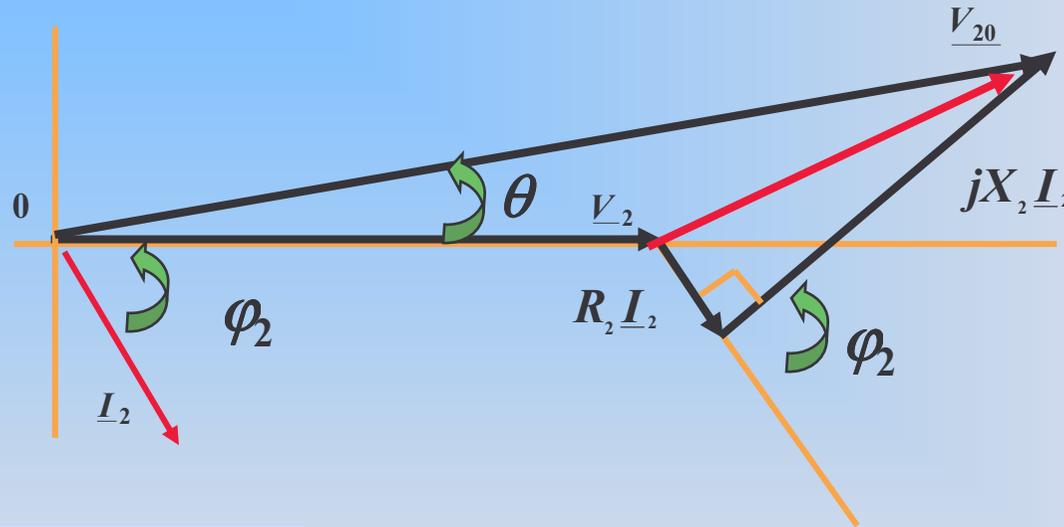
5.6- Chute de tension au secondaire

Fonctionnement en charge

$$\underline{V}_{20} = \underline{V}_2 + R_2 \underline{I}_2 + jX_2 \underline{I}_2$$

$$\theta \approx 0$$

$$V_{20} \cos \theta \approx V_2$$



soit

$$\Delta V_2 = V_{20} - V_2$$

$$\Delta V_2 = R_2 I_2 \cos \varphi_2 + X_2 I_2 \sin \varphi_2$$

soit

$$\Delta U_2 = \sqrt{3} \Delta V_2$$

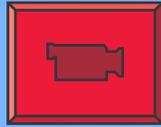
- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 
-

## 5.6 Fonctionnement en charge

## Transformateurs Triphasés

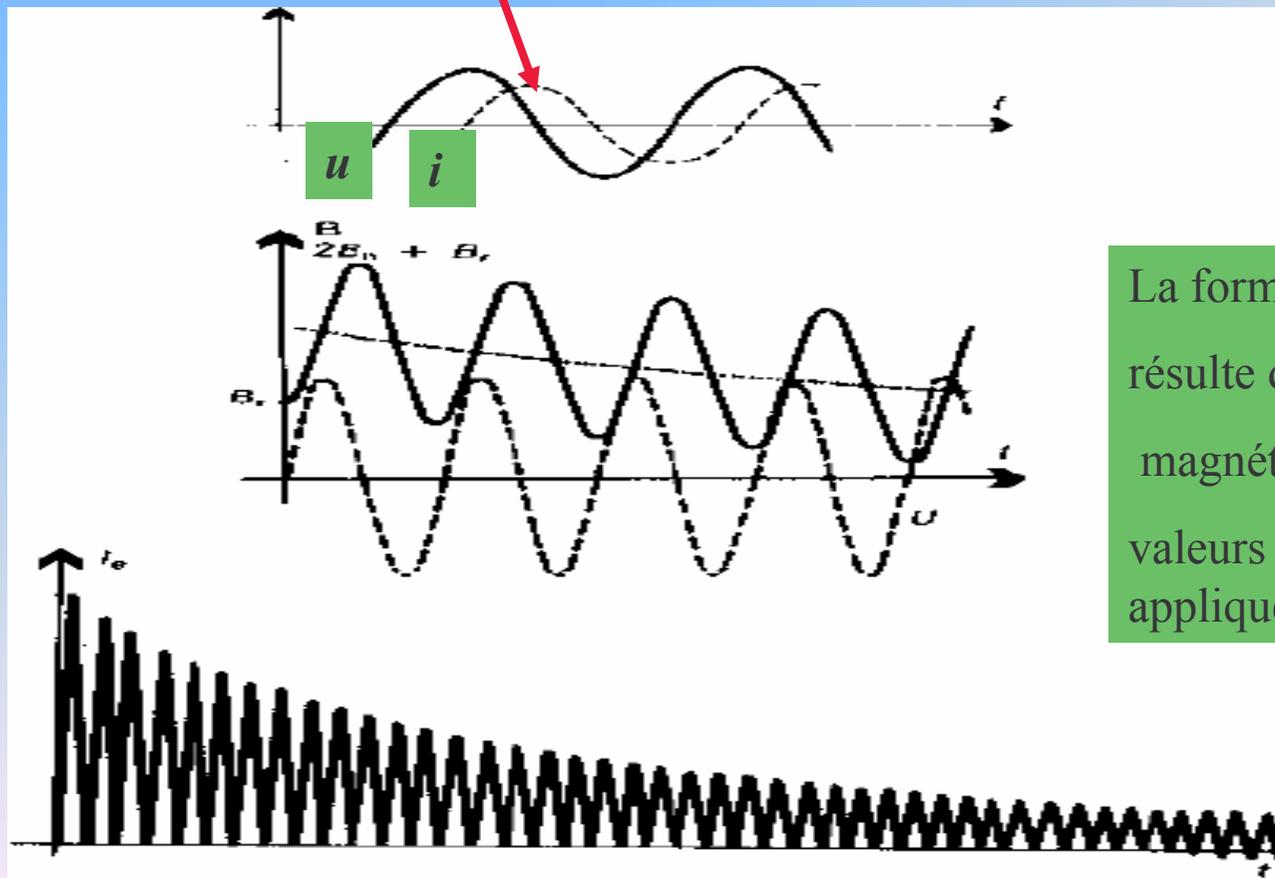
Le rendement

$$\eta = \frac{\sqrt{3}U_2 I_2 \cos\varphi_2}{\sqrt{3}U_2 I_2 \cos\varphi_2 + P_F^{tri} + 3R_2 I_2^2}$$



## ASPECTS TECHNIQUES Surintensité lors de mise sous tension

Le cas le plus défavorable est l'enclenchement sous tension nulle



La forme de ce courant résulte de la courbe du flux magnétique à partir des valeurs de la tension appliquée.

- 
- 
- 

# Transformateurs d'intensité



**LEM**

- 
- 
- 

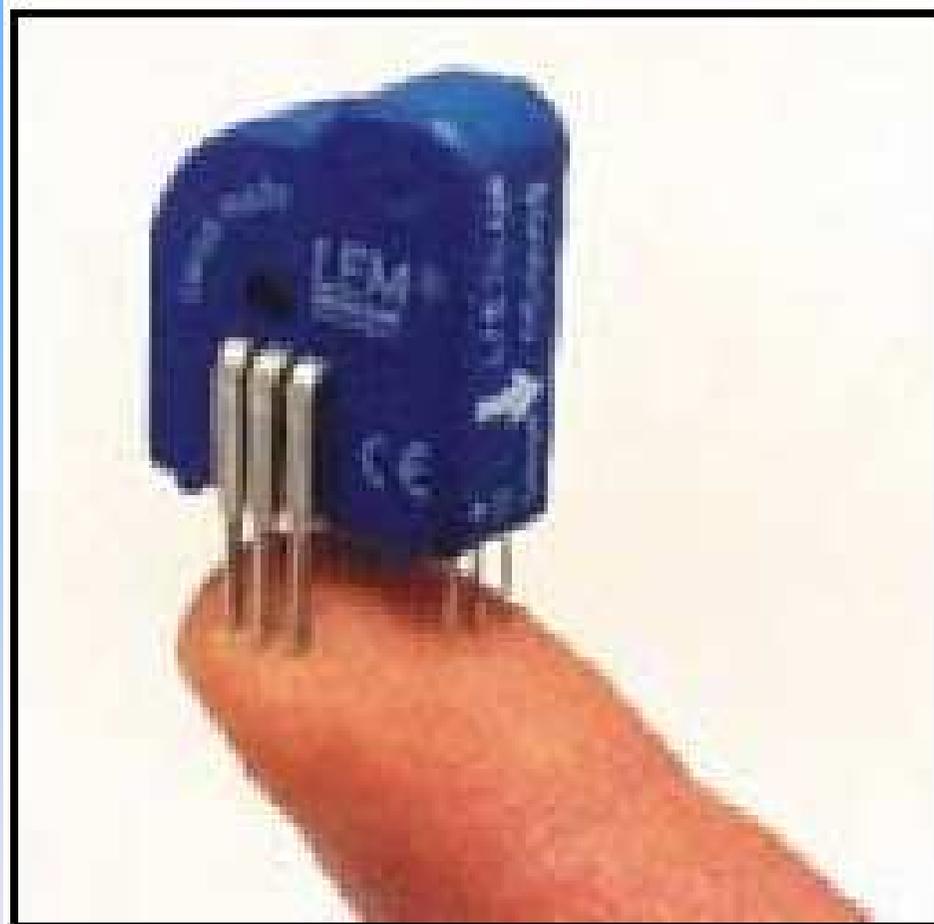
## Transformateurs d'intensité



- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 
-

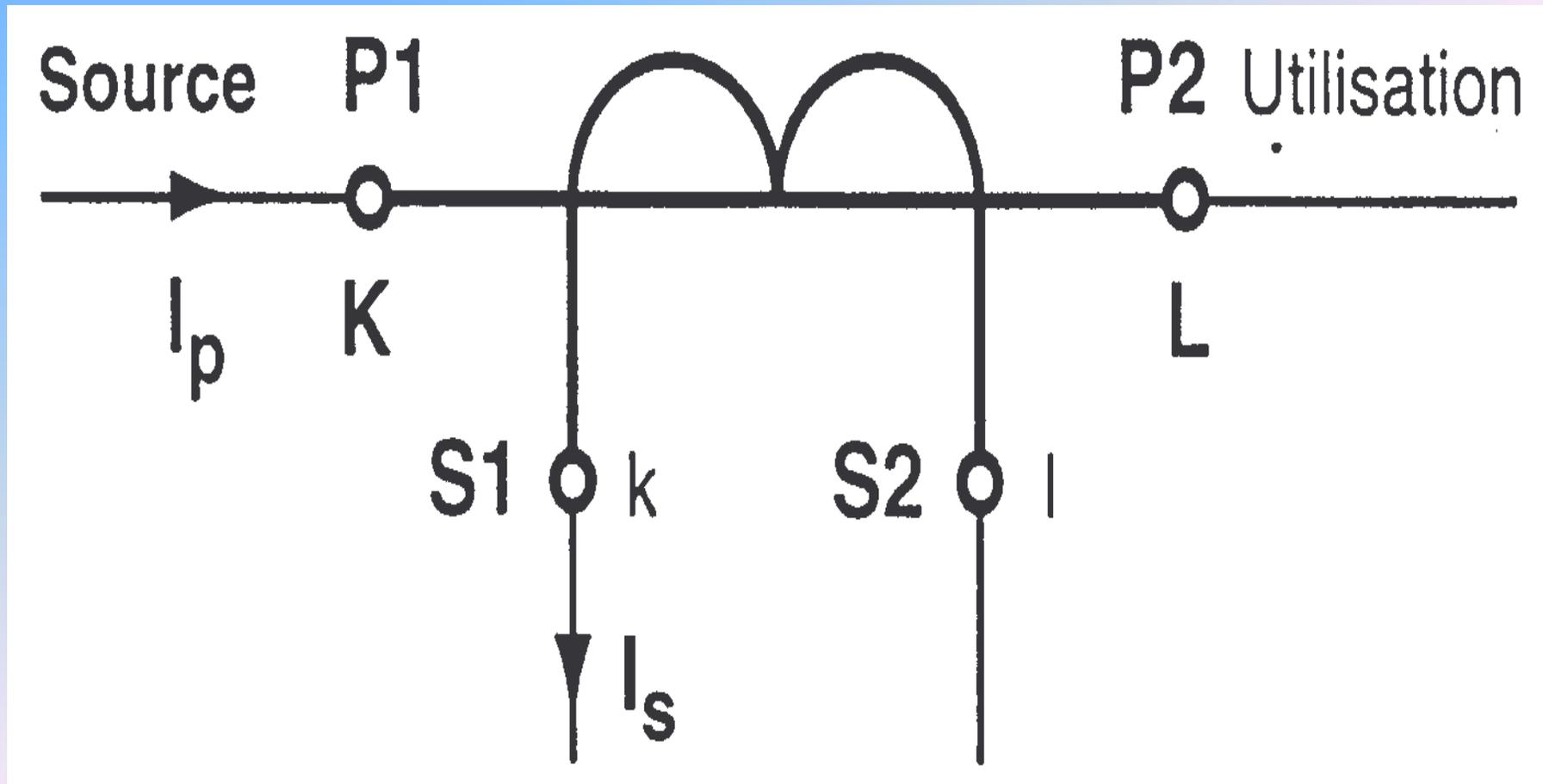
- 
- 
- 

## Transformateurs d'intensité



Le capteur compact LTS 25-NP.

# Transformateurs d'intensité

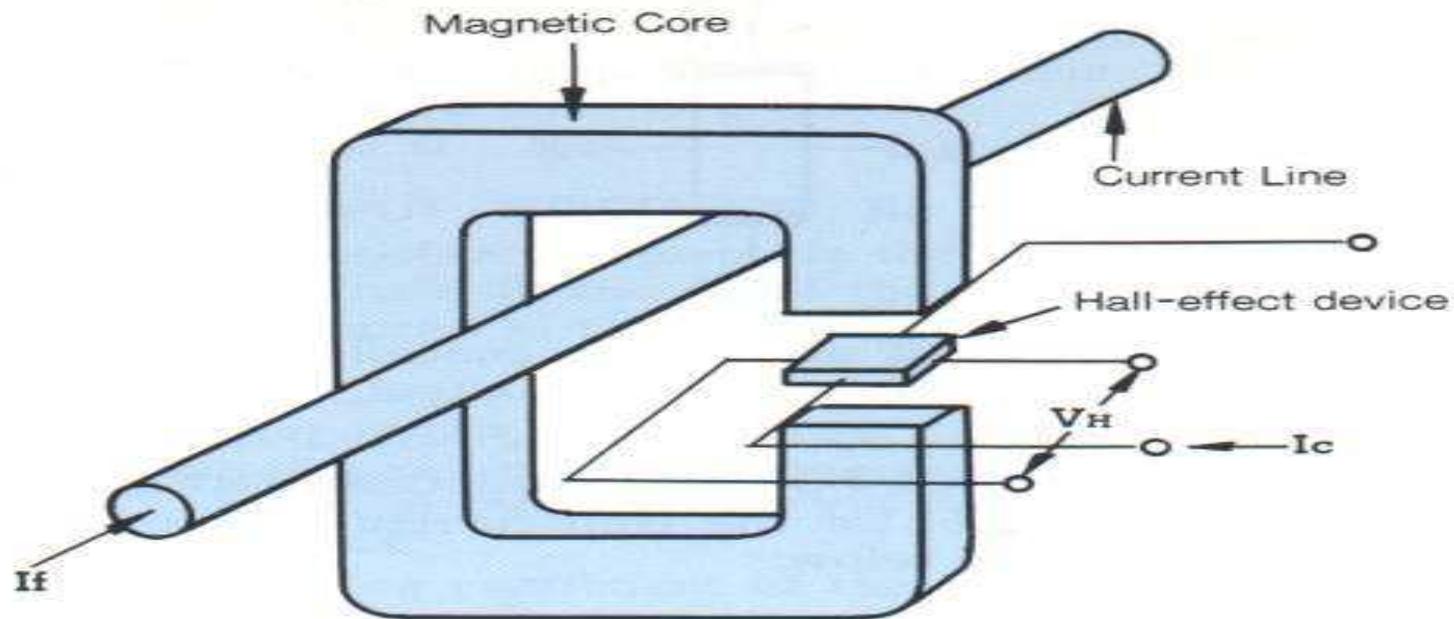


- 
- 
- 

# Sonde à effet Hall

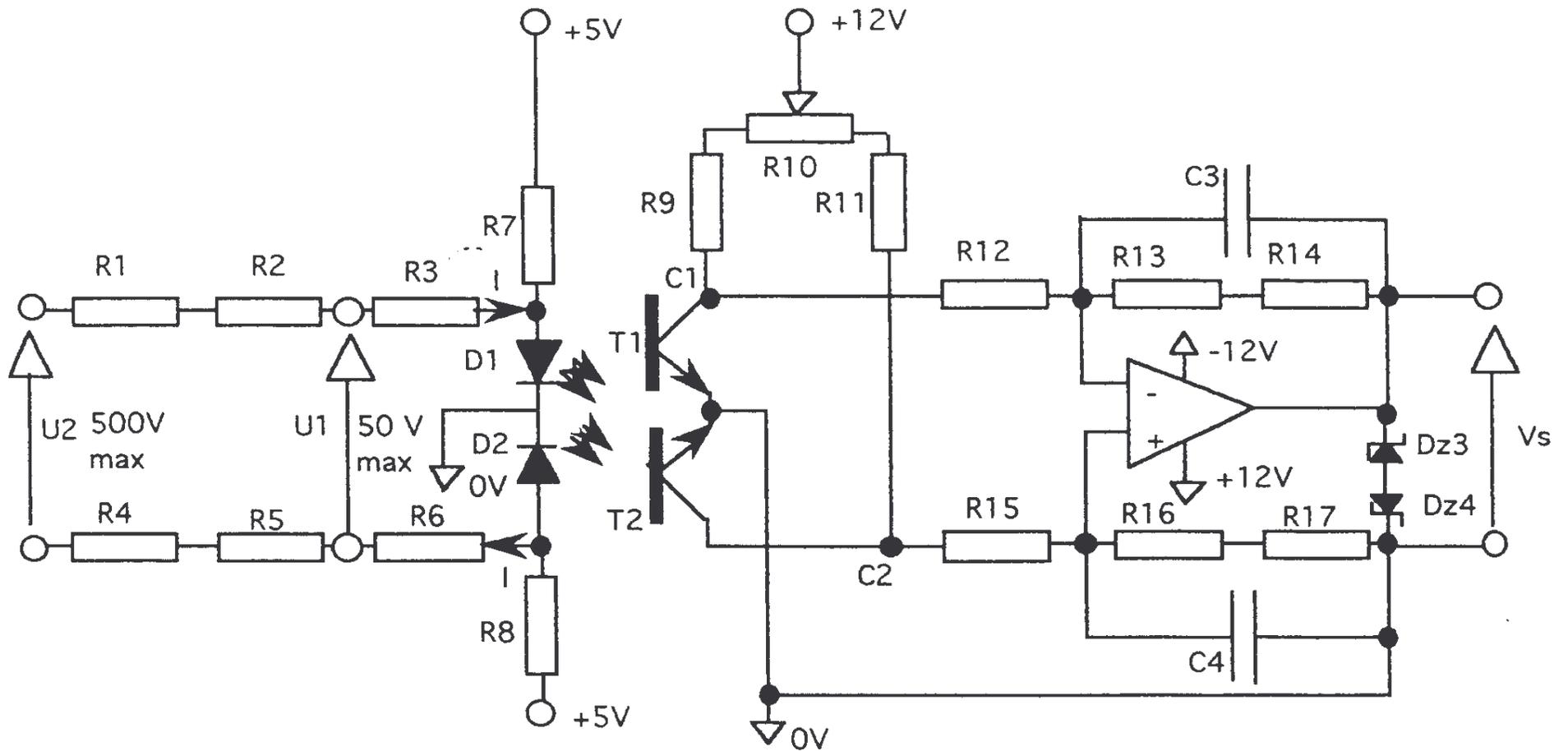
## 1.2 HALL CURRENT SENSOR

Hall current sensors have a simple structure consisting of a gapped magnetic core and a Hall-effect device placed in the gap in the magnetic core as shown in



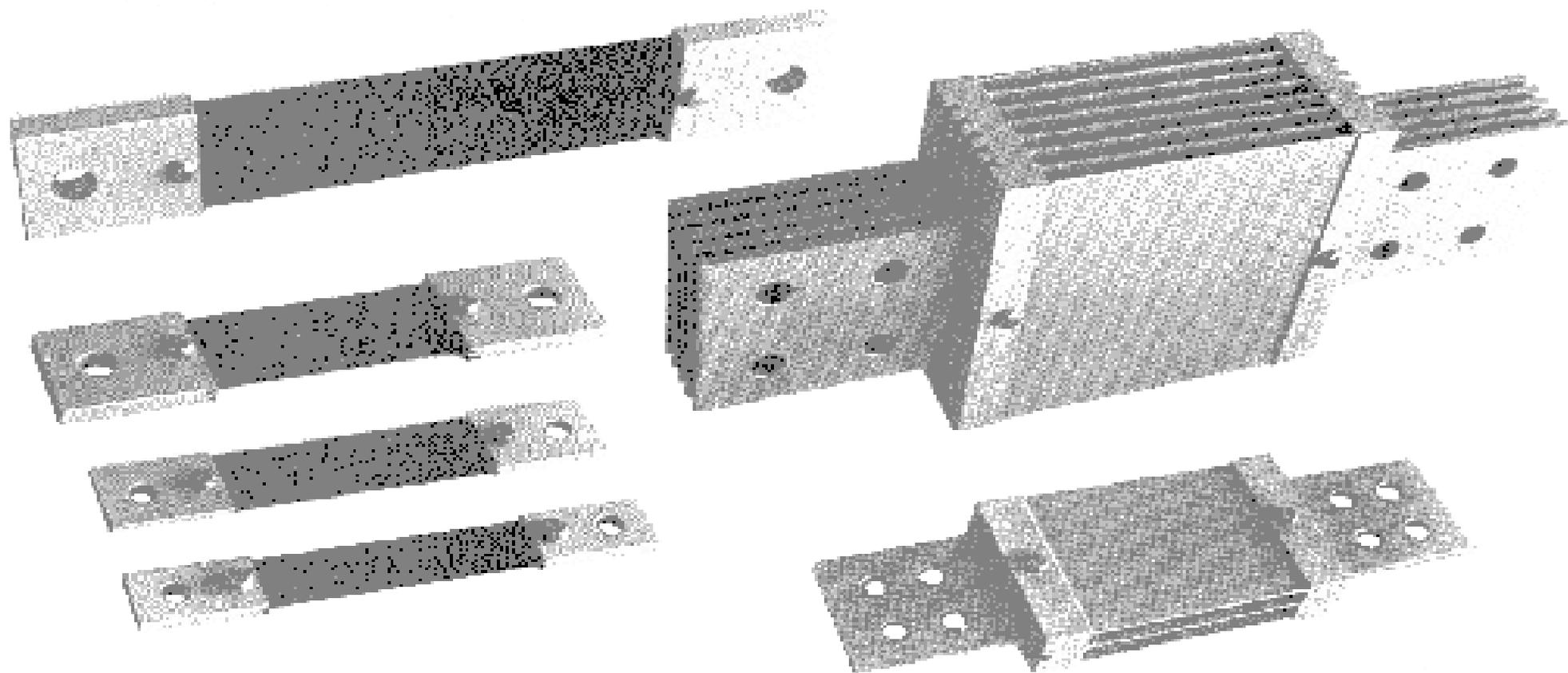
Schematic Representation of a Hall Current Sensor

# Sonde différentielle



- 
- 
- 

# Shunt-basse fréquence ou continu



- 
- 
- 

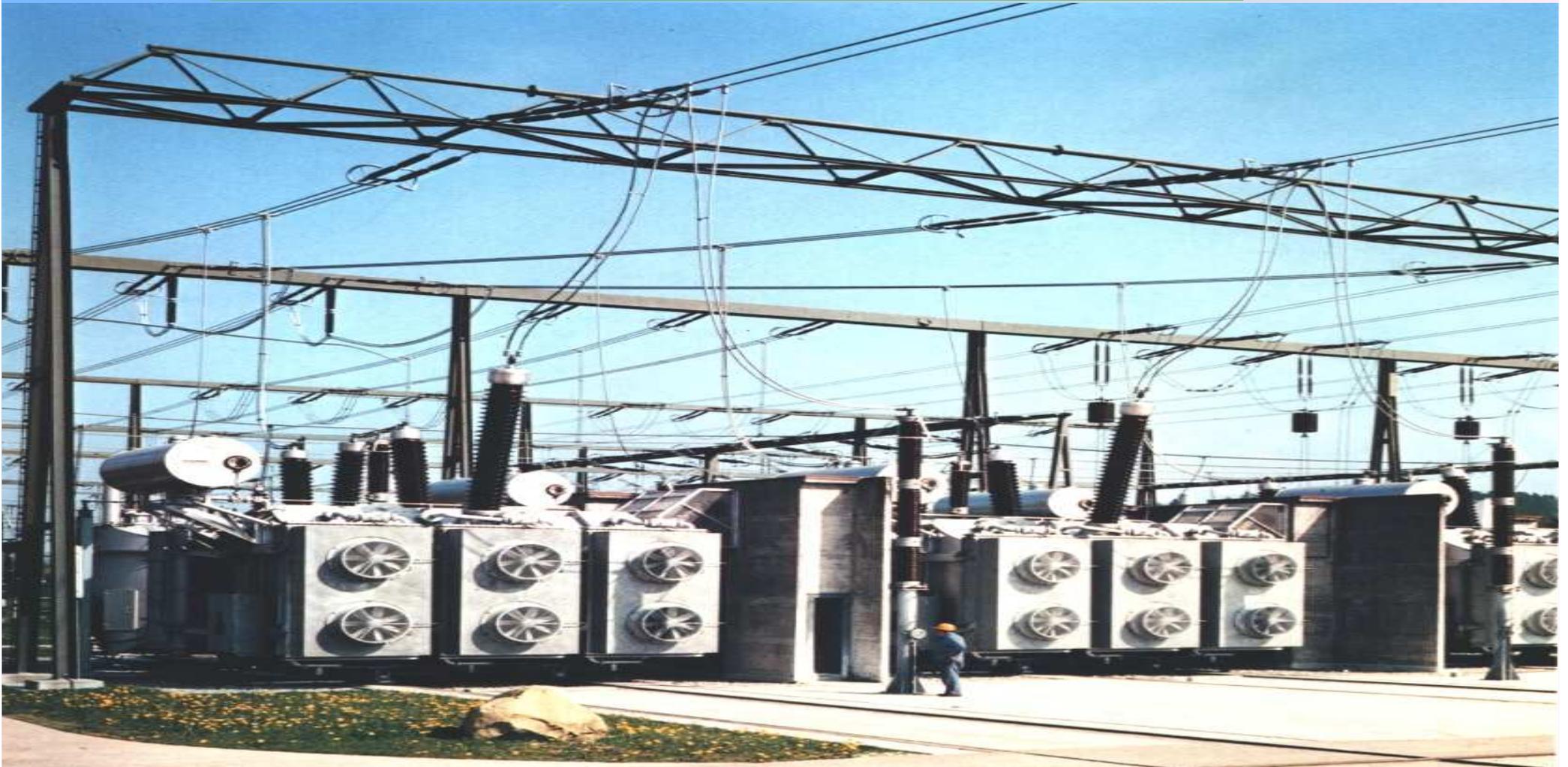
# ASPECTS TECHNIQUES



- 
- 
- 

# ASPECTS TECHNIQUES

## *Transformateur d'interconnexion de réseau*



- 
- 
- 

# ASPECTS TECHNIQUES

*Transformateur triphasé 450 MVA, 380 kV*



- 
- 
- 

## ASPECTS TECHNIQUES

*Transformateur triphasé 250 MVA, 735 kV*



- 
- 
- 

# Exercice

Un transformateur triphasé a les caractéristiques suivantes : 50 Hz, 100 kVA, 20 000 V/380 V.

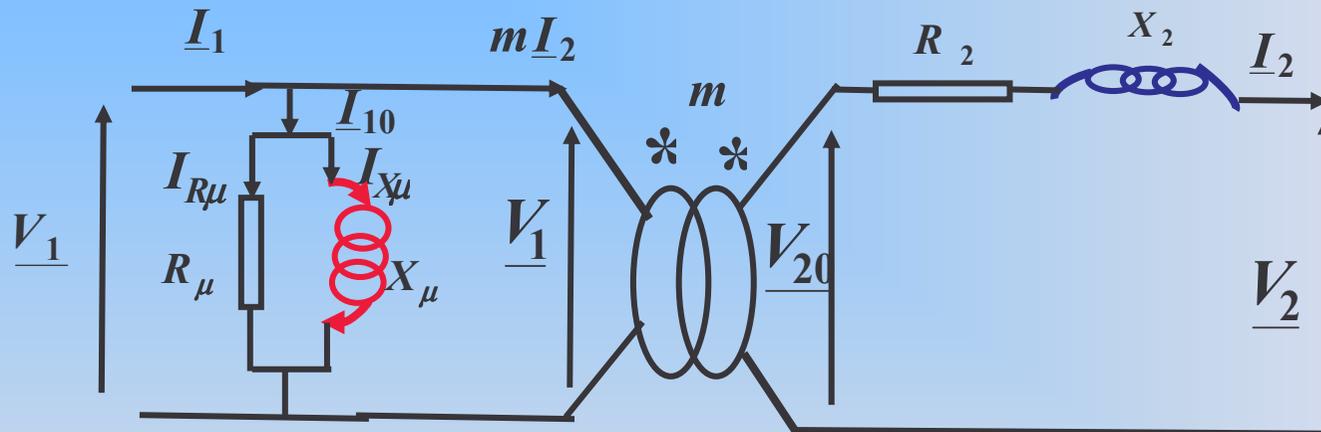
On relève lors d'un essai à vide :

- au primaire : 20 000 V - 0,05 A - 350 W
- au secondaire : 402 V.

Un essai en court-circuit est réalisé et on mesure au primaire : 800 V - 3 A - 2230 W.

# Exercice

1. Dessinez le schéma monophasé équivalent



# Exercice

2. Déterminez la valeur de chaque élément

$$R_{\mu} = \frac{V_1^2}{P_{10}} = 1140 \text{ k}\Omega$$

$$X_{\mu} = \frac{V_1^2}{\sqrt{(V_1 \cdot I_{10})^2 - P_{10}^2}} = 235 \text{ k}\Omega$$

$$Q = X_2 I_{2cc}^2$$

$$X_2 = \frac{Q}{I_{2cc}^2} = \frac{\sqrt{(V_{1cc} I_{1cc})^2 - \left(\frac{P_{cc}}{3}\right)^2}}{\left(\frac{I_{1cc}}{m}\right)^2}$$

$$X_2 = \frac{\sqrt{(461.88 \times 3)^2 - (743)^2}}{(149.25)^2} = 52.5 \text{ mH}$$

$$R_2 = \frac{P_{cc}}{(I_{2cc})^2} = \frac{743}{(149,25)^2} = 33 \text{ mH}$$

- 
- 
- 

# Exercice

3. Pour quelle valeur de courant le rendement est-il maximum? Quels sont alors la tension composée secondaire et le rendement pour un récepteur avec un facteur de puissance égale à 0.8 AR

$$I_2 = \sqrt{\frac{P_{10}}{3 \times R_2}} = 59.5 A$$

$$V_2 = V_{20} - (R_2 \cos \varphi_2 + X_2 \sin \varphi_2) \times I_2$$

$$V_2 = \frac{402}{\sqrt{3}} - (0.033 \times 0.8 + 0.0525 \times 0.6) \times 59.5 = 228.73V$$

donc

$$U_2 = 396.12V$$

$$\eta_{\max} = \frac{V_2 I_2 \cos \varphi_2}{V_2 I_2 \cos \varphi_2 + 2p_f} = 97,7\%$$